

МЕХАНИЧНА ИНТЕРПРЕТАЦИЯ НА ФОРМИРАНЕТО НА ПАСИВНИ ШАРНИРИ И ПРЕХОДА КЪМ МЕХАНИЗЪМ ПРИ ИСТОРИЧЕСКИ ЗИДАНИ АРКИ

Доц. д-р Нели Димитрова Тризлова
Варненски свободен университет „Черноризец Храбър“ – Варна

Резюме: Историческите зидани арки запазват своята устойчивост чрез преразпределение на вътрешните усилия и промяна на контактното състояние между отделните зидани елементи. В статията е предложена механична интерпретация на формирането на пасивни шарнири и прехода към механизъм на разрушение. Показано е, че наличието на множество видими пукнатини не е достатъчно условие за загуба на устойчивост и че определящо значение има механичната активност на шарнирните зони. Предложеният подход е проверен чрез анализ на реални исторически обекти и е разработен алгоритъм за инженерна оценка при конструктивното обследване на исторически зидани арки.

Ключови думи: исторически зидани арки; пасивни шарнири; контактно гранично състояние; механизъм на разрушение; конструктивно обследване; механична интерпретация.

MECHANICAL INTERPRETATION OF PASSIVE HINGE FORMATION AND THE TRANSITION TO COLLAPSE MECHANISM IN HISTORIC MASONRY ARCHES

Assoc. Prof. Dr. Neli Dimitrova Trizlova
Varna Free University “Chernorizets Hrabar” – Varna

Abstract: Historic masonry arches maintain their stability through the redistribution of internal forces and changes in the contact conditions between adjacent masonry units. This paper presents a mechanical interpretation of passive hinge formation and the transition to a collapse mechanism. It is shown that the presence of multiple visible cracks is not, by itself, sufficient evidence of structural instability, as the mechanical role of the hinge zones is the governing factor. The proposed approach is validated through the analysis of real historic masonry arches, and a practical algorithm for structural assessment during condition surveys is developed.

Keywords: historic masonry arches; passive hinges; contact limit state; collapse mechanism; structural assessment; mechanical interpretation.

1. Въведение

Зиданите арки са едни от най-разпространените конструктивни системи в историческото архитектурно наследство. Благодарение на способността си да предават натоварванията предимно чрез натиск, те могат да запазят носимоспособността си в продължение на столетия въпреки локални повреди, неравномерни слягания и многократни изменения на експлоатационните условия. Това се дължи на възможността за преразпределение на вътрешните усилия и за адаптация на конструкцията към промененото механично състояние [2].

В предходно изследване беше показано, че образуването на локални зони на декомпресия и последователното формиране на три пасивни шарнира не означават непременно загуба на носимоспособност. При наличие на геометрично допустима линия на натиск арката може да достигне ново равновесно състояние, което механично може да бъде разглеждано като адаптирана тришарнирна система [1]. Това състояние обаче не е окончателно. Последващи локални въздействия, неравномерни слягания, повреди в зидарията или други неблагоприятни фактори могат да предизвикат ново преразпределение на вътрешните усилия и да доведат до формиране на четвърти пасивен шарнир.

Основният въпрос не е дали може да се появи четвърти пасивен шарнир, а **къде** възниква той и **дали** неговото формиране води до загуба на геометрична неизменяемост на конструкцията. В инженерната практика мястото на локалното въздействие често се приема като най-вероятна зона на разрушение, но механичният отговор на арката се определя от поведението на цялата конструктивна система. Поради това критичната зона за достигане на ново гранично контактено състояние не е задължително да съвпада с мястото на приложеното въздействие.

Целта на настоящото изследване е да се формулира механична хипотеза за формирането на четвърти пасивен шарнир в адаптирана тришарнирна зидана арка и да се провери нейната приложимост чрез анализ на реални исторически зидани арки с документиран повреди. Особено внимание е отделено на връзката между локалните повреди, преразпределението на вътрешните усилия и възможността за развитие на критична зона, водеща до формиране на четвърти пасивен шарнир и преход към механизъм на разрушение.

2. Формиране на устойчиво равновесие и преход към механизъм на разрушение

2.1. Образуване на адаптирано тришарнирно равновесие

Зиданите арки представляват дискретни конструкции, изградени от отделни блокове, които взаимодействат помежду си чрез контактните повърхности. При липса на опън равновесието се осигурява чрез преразпределение на контактните напрежения, така че линията на натиск да остане в границите на арковия пръстен.

При изменение на натоварването, слягане на опорите или локални конструктивни повреди линията на натиск постепенно се измества към интрадоса или екстрадоса. В критичните сечения контактната площ намалява, докато натисковата резуланта достигне ръба на сечението. В този момент контактната връзка губи способността си да пренася огъващ момент и се формира пасивен шарнир, който позволява относително завъртане между съседните зидани елементи.

Последователното образуване на три пасивни шарнира не води до непосредствена загуба на носимоспособност. Конструкцията достига ново равновесно състояние, при което вътрешните усилия се преразпределят и арката започва да работи като адаптирана тришарнирна система. Това състояние представлява механична адаптация към изменените условия на натоварване и може да се запази, докато линията на натиск остава в активната контактна зона на арковия пръстен.

2.2. Формиране на четвърти пасивен шарнир и преход към механизъм

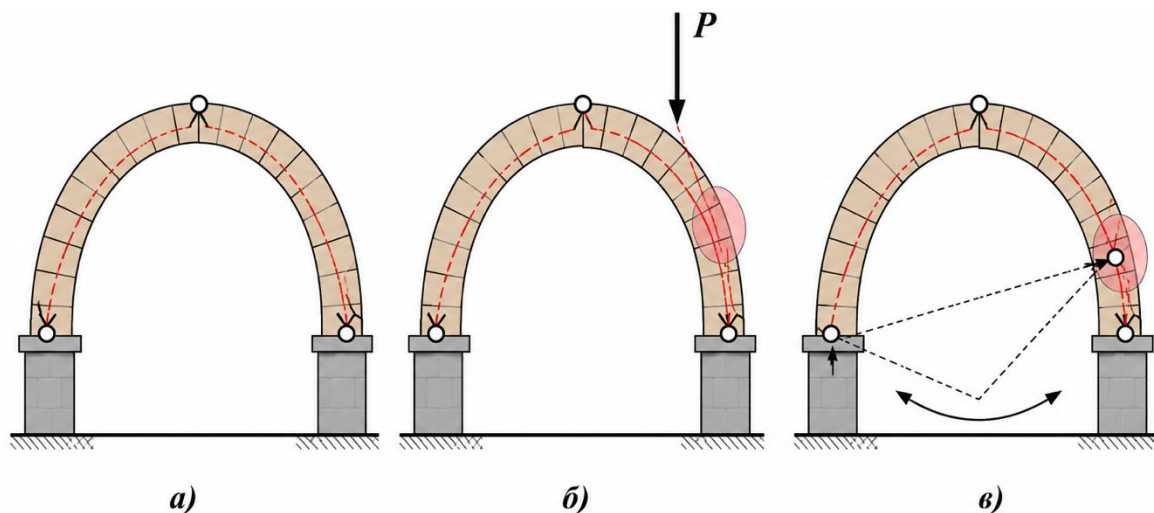
При последващо изменение на натоварването или на граничните условия адаптираното тришарнирно равновесие може да бъде нарушено. Новото преразпределение на вътрешните усилия изменя положението на линията на натиск и създава условия за развитие на допълнителна зона на декомпресия. При достигане на гранично контактното състояние в ново сечение се формира четвърти пасивен шарнир.

Формирането на четвърти пасивен шарнир не трябва да се разглежда като непосредствен признак за разрушаване на арката. То показва, че възможностите за адаптация на тришарнирната схема са изчерпани, но само по себе си не доказва загуба на устойчивост.

Преходът към механизъм на разрушение настъпва единствено когато четирите активни пасивни шарнира образуват кинематично допустима конфигурация, позволяваща свободно относително движение на отделните части на арката. Следователно е необходимо ясно да се разграничават две различни състояния –

формирането на четвърти пасивен шарнир като локално контактно гранично състояние и **образуването на механизъм на разрушение** като загуба на геометрична неизменяемост на конструкцията (фиг. 1). Преходът между тези три състояния е последователен и не настъпва мигновено.

Именно това разграничение е в основата на предложената в настоящото изследване механична интерпретация.



Фиг. 1. Развитие на критично контактно състояние в адаптирана тришарнирна зидана арка: а) начална тришарнирна равновесна схема; б) изместване на линията на натиск при локално допълнително въздействие; в) формиране на четвърти пасивен шарнир и преход към кинематично изменяема система

3. Видими пукнатини, пасивни шарнири и механизъм на разрушение

При конструктивното обследване на исторически зидани арки често се установяват множество пукнатини в зоните на петите, короната, четвъртините на отвора и прилежащата зидария. Техният брой обаче не може да бъде използван непосредствено за определяне на броя на пасивните шарнири. Видимата пукнатина представлява геометричен и диагностичен признак за изменение на локалното състояние, но не всяка пукнатина води до пълна загуба на контакт и до възможност за относително завъртане между съседните части на арковия пръстен.

За формиране на пасивен шарнир е необходимо активната контактна зона във фугата да намалее до такава степен, че натисковата резуланта да достигне единия ръб на сечението. Едва тогава контактът губи способността си да предава огъващ момент и се създава възможност за относително завъртане. Пукнатини, които са повърхностни,

ограничени в разтвора, развити в прилежащия надзид или запазват значителна контактна площ в дълбочина, не трябва да се приемат автоматично за пасивни шарнири.

Поради това наличието на четири или повече видими пукнатини не означава непременно, че арката е преминала в четиришарнирен механизъм. Механизъм на разрушение възниква само когато четири действително активни контактни шарнира са разположени така, че разделят арковия пръстен на твърди участъци, способни на съгласувано относително завъртане. Следователно решаващо значение имат не броят на пукнатините, а тяхната механична активност, страната на отваряне и взаимното им разположение.

4. Предпоставки за формиране на четвърти пасивен шарнир

След достигане на адаптирано тришарнирно равновесие механичното поведение на зиданата арка се определя от новото разпределение на вътрешните усилия и от контактното състояние между отделните зидани елементи. Това равновесие може да се запази продължително време, ако натоварванията и граничните условия останат непроменени. При промяна на някой от тези фактори възниква ново преразпределение на усилията, което изменя положението на линията на натиск и създава предпоставки за развитие на нови зони на декомпресия.

Особено неблагоприятно влияние оказват локалните и несиметричните въздействия, неравномерните слягания на опорите, разрушаването на отделни зидани единици, влошаването на контактните фуги и геометричните деформации на арковия пръстен. Тези фактори не действат изолирано, а променят работата на цялата конструкция. В резултат критичната зона за формиране на четвърти пасивен шарнир може да се развие на място, различно от зоната на първоначалното въздействие.

Следователно оценката на техническото състояние на историческите зидани арки не трябва да се основава единствено на разположението на видимите пукнатини или локалните повреди. По-съществено е да се установи дали вследствие на преразпределението на вътрешните усилия съществуват условия за достигане на ново гранично контактено състояние и за формиране на четвърти пасивен шарнир. Именно тази постановка е в основата на формулираната в следващия раздел научна хипотеза.

5. Научна хипотеза

Въз основа на механичното поведение на зиданите арки се формулира хипотезата, че наличието на множество видими пукнатини не е достатъчно условие за образуване на механизъм на разрушение. Част от наблюдаваните повреди могат да представляват

повърхностни, неактивни или локално ограничени пукнатини, при които контактната връзка в дълбочина е частично запазена и не е възможно свободно относително завъртане на съседните части.

Опасна за устойчивостта е онази нова пукнатина, която се развива до гранично контактено състояние и се превръща в активен пасивен шарнир, чието местоположение и страна на отваряне допълват вече съществуващите активни шарнирни зони до кинематично допустим четиришарнирен механизъм.

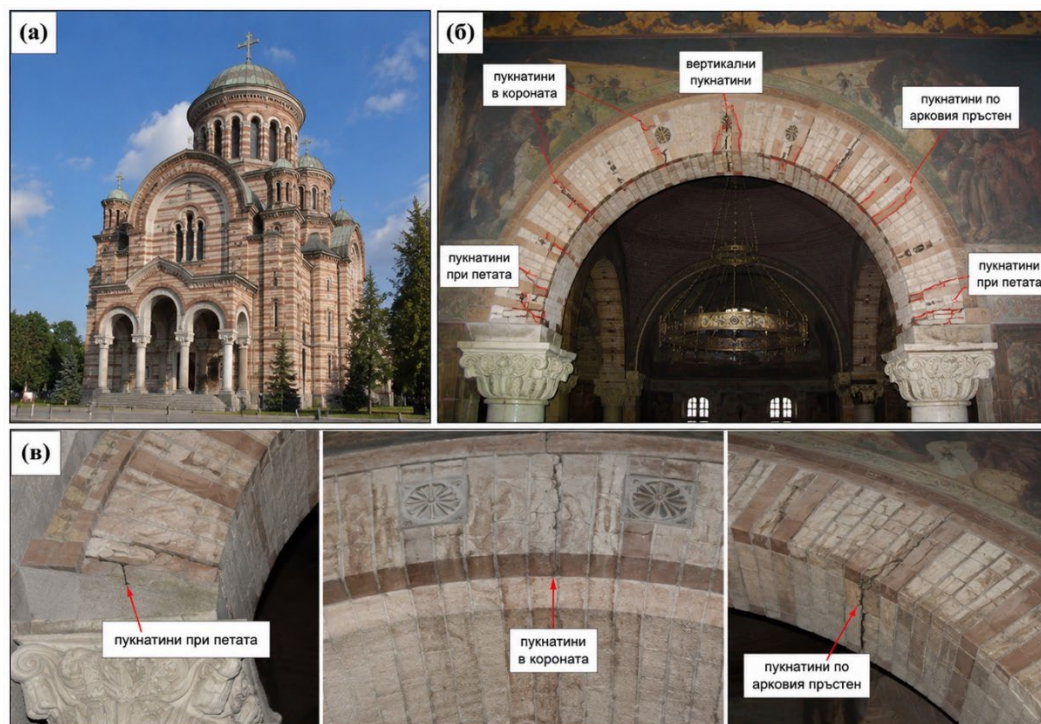
Следователно критичната зона не се определя от броя или визуалната изразеност на пукнатините, а от съвместния анализ на тяхната дълбочина, контактено състояние, активност, развитие във времето и положение спрямо възможната схема на разрушение.

6. Проверка на научната хипотеза чрез реални исторически зидани арки

Проверката на предложената научна хипотеза се извършва чрез анализ на реални исторически зидани арки с документираните повреди и резултати от конструктивни обследвания. Целта е да се установи дали броят и местоположението на видимите пукнатини могат самостоятелно да бъдат използвани като критерий за формиране на механизъм на разрушение.

За анализа са подбрани два обекта, за които са налични резултати от визуални обследвания, документираните пукнатини и оценка на конструктивното поведение. Съпоставени са разположението на повредите, тяхната предполагаема контактна активност и възможността да участват във формирането на кинематично допустим механизъм.

6.1. Анализ на повредите в зиданите арки на Millennium Church, Тимишоара (Румъния) (фиг. 2)



Фиг. 2 Документирани повреди в зидана арка на Millennium Church, Тимишоара, Румъния: а) общ изглед на сградата; б) разположение на характерните пукнатини по арката; в) детайли на зоните с декомпресия и развитие на пукнатини. *Адаптирано по Ranaldo et al.*

Като първи пример за проверка на предложената научна хипотеза е анализирана Millennium Church в Тимишоара, Румъния [9]. Конструктивното обследване документира характерни пукнатини в областта на петите, короната и арковия пръстен, както и локални разкрития на фугите, свидетелстващи за изменение на контактното състояние в отделни сечения.

От гледна точка на предложената механична интерпретация съществено значение има фактът, че разположението на пукнатините не може да бъде обяснено единствено чрез мястото на първоначалното въздействие. Наблюдаваните повреди отразяват изменението на механичното състояние на цялата арка, при което контактните зони и линията на натиск се променят в резултат на общата работа на конструкцията.

Документираната схема на напукване показва наличие на повече от четири видими пукнатини, без да е настъпило разрушаване на арката. Това потвърждава, че видимите пукнатини не могат автоматично да бъдат интерпретирани като отделни пасивни шарнири. Част от тях могат да бъдат повърхностни, да принадлежат към една и съща

зона на декомпресия или да не са свързани с пълна загуба на контакт между съседните зидани елементи.

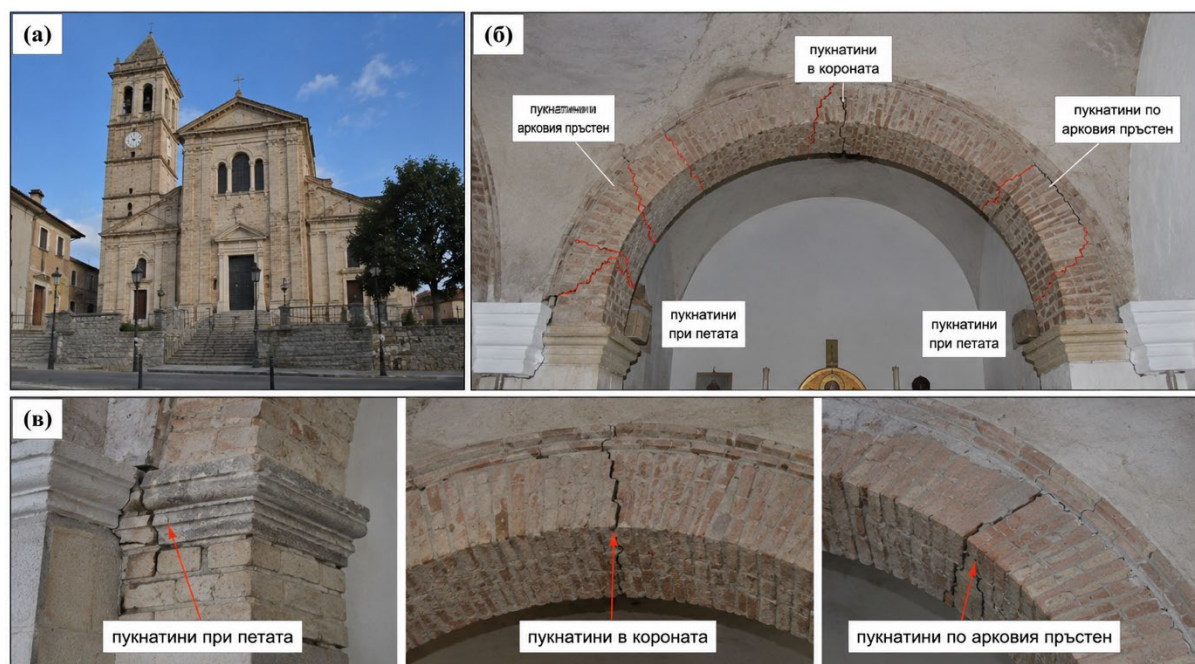
Следователно разглежданият пример подкрепя предложената научна хипотеза, че оценката на устойчивостта на историческите зидани арки следва да се основава не на броя на наблюдаваните пукнатини, а на анализа на тяхната механична активност и на възможността те да участват във формирането на кинематично допустим механизъм.

6.2. Анализ на повредите в историческа зидана арка на църквата Sant'Andrea, Анани (Италия) (фиг. 3)

Като втори пример за проверка на предложената научна хипотеза е разгледана историческа зидана арка от църквата **Sant'Andrea** в Анани, Италия [10]. Конструктивното обследване включва геодезическо заснемане, картиране на повредите и анализ на конструктивното поведение на арката. Документирани са пукнатини в областта на петите, короната и арковия пръстен, както и локални разкрития на фугите, свидетелстващи за изменение на контактното състояние.

От гледна точка на предложената механична интерпретация разположението на наблюдаваните повреди показва, че развитието на пукнатините не може да бъде обяснено единствено чрез мястото на първоначалното въздействие. Изменението на контактното състояние е резултат от общото механично поведение на арката, при което критичната зона се определя от цялостната работа на конструкцията.

Както при предходния пример, и тук са документирани множество видими пукнатини, без да е налице механизъм на разрушение. Това показва, че наличието на пукнатини в характерните зони на арката не е достатъчно основание да се приеме формиране на четири активни пасивни шарнира. За такава оценка е необходимо да се анализират контактното състояние, запазената контактна площ, страната на отваряне на пукнатините и възможността за относително завъртане между отделните части на арката.



Фиг.3 Конструктивно обследване на историческа зидана арка в църквата Sant'Andrea, Анани, Италия: а) общ изглед на сградата; б) обследвана арка с документираните повреди; в) характерни пукнатини, свидетелстващи за локални зони на декомпресия и преразпределение на вътрешните усилия. *Адаптирано по Betti et al*

Следователно и този пример потвърждава предложената научна хипотеза, че оценката на техническото състояние на историческите зидани арки трябва да се основава на механичната активност на установените повреди и на тяхното участие във формирането на кинематично допустим механизъм, а не единствено на техния брой или местоположение.

6.3. Сравнителен анализ на разгледаните практически примери

Двата разгледани практически примера показват сходно механично поведение, независимо от различията в геометрията, възрастта и експлоатационните условия на изследваните арки. И в двата случая конструктивното обследване установява множество видими пукнатини, разположени в характерните зони на арковия пръстен, без да е настъпила загуба на устойчивост или формиране на механизъм на разрушение.

Сравнителният анализ показва, че между броя на видимите пукнатини и механичното състояние на конструкцията не съществува еднозначна зависимост. Наличието на множество пукнатини не означава непременно формиране на четири активни пасивни шарнира, както и липсата на ясно изразени повреди не изключва възможността за развитие на критично контактно състояние.

Общото и при двата случая е, че наблюдаваните повреди са резултат от изменението на контактното взаимодействие между отделните зидани елементи и от адаптацията на конструкцията към променените условия на работа. Следователно инженерната оценка не трябва да се основава единствено на визуалното картиране на пукнатините, а на механичен анализ на контактното състояние, положението на линията на натиск и възможността за формиране на кинематично допустим механизъм.

Получените резултати потвърждават предложената научна хипотеза, че определящ критерий за оценка на устойчивостта на историческите зидани арки не е броят на видимите пукнатини, а идентифицирането на активните пасивни шарнири, които могат съвместно да изградят механизъм на разрушение. Това позволява по-надеждна интерпретация на резултатите от конструктивното обследване и създава основа за обосновано планиране на мониторинга и укрепителните мероприятия (таблица 1).

Сравнението между двата разгледани обекта показва, че сходни визуални схеми на напукване могат да съответстват на различна степен на механична активност. Поради това всяка установена пукнатина следва да се оценява спрямо запазената контактна площ, страната на отваряне, възможността за относително завъртане и положението ѝ в предполагаемата кинематична схема. Само съвкупната оценка на тези признаци позволява да се разграничат стабилизираните локални повреди от критичните шарнирни зони, които могат да участват в развитието на механизъм на разрушение.

Таблица 1 Сравнителен анализ на изследваните исторически зидани арки и проверка на научната хипотеза

Наблюдение	Millennium Church	Sant'Andrea
Наличие на множество видими пукнатини	Да	Да
Пукнатините са повече от три	Да	Да
Налице е пълно разрушаване на арката	Не	Не
Всички пукнатини могат да се приемат за активни шарнири	Не е доказано	Не е доказано
Необходим е анализ на контактната активност	Да	Да
Броят на пукнатините сам по себе си определя механизма	Не	Не

7. Практическо приложение на предложената механична интерпретация при конструктивното обследване

Предложената механична интерпретация на формирането на четвърти пасивен шарнир има пряко практическо приложение при конструктивното обследване на исторически зидани арки. За разлика от традиционния подход, при който основно внимание се обръща на местоположението и броя на видимите пукнатини, предложеният метод разглежда арката като единна механична система, в която повредите са външна проява на изменението на контактното състояние и на преразпределението на вътрешните усилия.

При обследването първоначално се извършва подробно картиране на всички видими повреди – пукнатини, разкрити фуги, локални разрушения и деформации на арковия пръстен (фиг.4). Тези наблюдения сами по себе си не позволяват да се направи заключение за наличието на механизъм на разрушение, тъй като не всяка пукнатина представлява активен пасивен шарнир.

Следващата стъпка е механичната интерпретация на установените повреди. Анализира се дали отделните пукнатини са свързани със загуба на контакт в напречното сечение, дали позволяват относително завъртане между съседните части на арката и дали са съвместими с възможното положение на линията на натиск. По този начин могат да бъдат разграничени локалните повреди от действително активните шарнирни зони.

След определяне на активните шарнирни зони се анализира тяхното взаимно разположение. Ако е формирано устойчиво тришарнирно равновесие, се оценява в кои участъци последващо изменение на контактното състояние би могло да доведе до формиране на четвърти активен пасивен шарнир. Именно тези участъци представляват критичните зони, които изискват най-внимателно наблюдение и при необходимост – инструментален мониторинг.

Практическото значение на предложения подход се състои в това, че позволява инженерната оценка да бъде насочена към действително опасните участъци на конструкцията. Вместо всички наблюдавани пукнатини да се приемат като еднакво значими, те се оценяват според тяхната механична роля в общата работа на арката. Това създава възможност за по-надеждна оценка на носимоспособността, за по-точно определяне на необходимостта от укрепване и за ограничаване на ненужните намеси в историческата конструкция.

Въз основа на проведеното изследване може да се приеме, че при обследването на исторически зидани арки определящо значение има не броят на пукнатините, а

тяхната механична активност и участието им в общата кинематична схема на конструкцията. Само пукнатина, която съответства на активно контактно гранично състояние и допълва съществуващите шарнирни зони до кинематично допустим механизъм, следва да се разглежда като реална заплаха за устойчивостта на арката.

Това разграничение позволява обследването да бъде насочено не към механичното регистриране на всички видими дефекти, а към определяне на онези зони, в които е възможна загуба на контакт и развитие на относително завъртане. По този начин могат да се формулират по-точни критерии за инструментален мониторинг, да се проследи развитието на критичните пукнатини във времето и да се изберат укрепителни мерки, съобразени с действителния механизъм на работа на арката.



Фиг.4 Методика за определяне на критичната зона и оценка на опасността от формиране на механизъм при исторически зидани арки

8. Заключение

Историческите зидани арки представляват конструкции с висока способност за преразпределение на вътрешните усилия, което им позволява да запазят своята устойчивост дори при наличие на локални повреди, пукнатини и частична загуба на

контакт между отделните зидани елементи. Поради тази особеност оценката на тяхното конструктивно състояние не може да се основава единствено на визуално установените повреди, а изисква анализ на механичното поведение на арката като единна конструктивна система.

В настоящото изследване е разгледан процесът на преход от контактено гранично състояние към механизъм на разрушение чрез формирането на пасивни шарнири. Показано е, че образуването на три пасивни шарнира води до адаптирано тришарнирно равновесие, при което арката запазва своята носимоспособност чрез преразпределение на вътрешните усилия. Формирането на четвърти пасивен шарнир представлява необходима, но не и достатъчна предпоставка за възникване на механизъм, тъй като определящо значение има неговото взаимно разположение спрямо вече съществуващите активни шарнирни зони.

Анализът на реални исторически обекти потвърждава, че наличието на множество видими пукнатини не означава автоматично загуба на устойчивост или формиране на механизъм. Част от наблюдаваните повреди не участват активно в кинематичната схема на конструкцията и не водят до развитие на механизъм на разрушение. Това показва, че при конструктивното обследване основно значение има механичната интерпретация на установените повреди, а не единствено тяхното картиране.

Въз основа на проведеното изследване е предложена механична интерпретация на формирането на четвъртия пасивен шарнир и е разработен алгоритъм за инженерна оценка на критичните шарнирни зони при конструктивното обследване на исторически зидани арки. Предложеният подход позволява да бъдат разграничени локалните повреди от действително опасните зони, които могат да доведат до формиране на механизъм, и по този начин подпомага оценката на конструктивната безопасност, планирането на мониторинга и избора на подходящи мерки за укрепване.

Научният принос на настоящото изследване се състои в разработването на механична интерпретация на прехода от контактено гранично състояние към механизъм на разрушение чрез формирането на четвърти пасивен шарнир, както и в предложената методика за идентифициране на критичните шарнирни зони при конструктивното обследване на исторически зидани арки. Получените резултати разширяват инженерното разбиране за механичното поведение на историческите зидани конструкции и създават практически приложим подход за оценка на риска и вземане на решения при тяхното опазване и укрепване.

ЛІТЕРАТУРА

1. Heyman J., The Stone Skeleton. *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 2, No. 2, pp. 249–279, DOI: 10.1016/0020-7683(66)90018-7, 1966;
2. Heyman J., *The Masonry Arch*, Ellis Horwood, Chichester, 1982;
3. Drucker D. C., Prager W., Greenberg H. J., Extended Limit Design Theorems for Continuous Media, *Quarterly of Applied Mathematics*, Vol. 9, No. 4, pp. 381–389, 1952;
4. Como M., *Statics of Historic Masonry Constructions*, Springer Series in Solid and Structural Mechanics, Springer International Publishing, 2017;
5. Angelillo M. (Ed.), *Mechanics of Masonry Structures*, CISM International Centre for Mechanical Sciences, Vol. 551, Springer, Vienna, 2014;
6. Angelillo M., Masonry Behaviour and Modelling, In: Angelillo M. (Ed.), *Mechanics of Masonry Structures*, CISM International Centre for Mechanical Sciences, Vol. 551, pp. 1–26, Springer, Vienna, 2014;
7. Gilbert M., Limit Analysis Applied to Masonry Arch Bridges: State-of-the-Art and Recent Developments, In: *Proceedings of the 5th International Conference on Arch Bridges (ARCH'07)*, Madeira, Portugal, 2007;
8. Boothby T. E., Coronelli D., The Stone Skeleton: A Reappraisal. *Heritage*, Vol. 7, No. 5, DOI: 10.3390/heritage7050107, 2024;
9. Ranaldo, A., Lo Monaco, A., D'Amato, M., Gigliotti, R., Mosoarca, M., Dragomir, L.O. *Analysis of Crack Patterns on Arches and Vaults of an Existing Masonry Church: The Case of Millenium Church in Timisoara*. 2025;
10. Paris, V., Damiani, N., Sousamli, M., Ehrenbach, I., Lorello, M., Nettis, A., Montanino, A., Meriggi, P. *Traditional Tools and Modern Technologies for the Analysis of Masonry Structures: The Case of the Church of Saint Andrea in Anagni*. Structural, 2022. DOI: 10.12917/STRU241.12.